

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ИНТЕГРАЛОВ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН В НЕОДНОРОДНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

Е.В. Михайлов, Р.А. Дудов, П.Н. Захаров, А.В. Козарь, А.Ф. Королев
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова
Кафедра фотоники и физики микроволн
emih@list.ru

В работе впервые проведено сравнение результатов расчета распространения радиоволн внутри зданий методом конечных интегралов и результатов экспериментальных исследований, показавшее высокую точность метода (СКО 2 – 3.7 дБ) и возможность детализации расчета среднего локального уровня поля вплоть до пространственных масштабов длины волны.

В данной работе описано моделирование пространственных распределений уровня э/м поля в кусочно-однородной анизотропной среде с размерами, существенно превышающими длину волны, и размерами неоднородностей, сравнимыми с длиной волны, на примере области в здании. Моделирование производилось методом конечных интегралов (FIT). Результат имеет непосредственное практическое применение – планирование и разработка систем беспроводной связи и вещания.

Методы прогнозирования распространения радиоволн подразделяются на эмпирические, статистические и детерминированные. На практике широкое применение до настоящего времени находили эмпирические и статистические модели ввиду их простоты и низкой вычислительной трудоемкости. Тем не менее, тенденции развития радиосвязи приводят к неприменимости эмпирических и статистических методов для современных систем цифровой радиосвязи и вещания. Такие методы неработоспособны для малых размеров сот, характерных для современных и будущих систем связи ввиду высокой емкости, из-за высокой неоднородности и анизотропии среды [1]. Кроме того, они описывают канал лишь потерями, что недостаточно для определения характеристик современных цифровых систем (OFDM, MIMO, UWB и др.). Это приводит к необходимости применения детерминированных методов описания распространения радиоволн. Детерминированные методы позволяют с высокой точностью рассчитать произвольные характеристики многолучевого радиоканала, основываясь на детальном знании о конкретной среде (пространственном распределении электрофизических характеристик среды).

Наиболее точными детерминированными методами моделирования распространения радиоволн (РРВ) являются методы численного решения уравнений Максвелла (FDTD, FEM, FIT и др.). Тем не менее, ввиду высокой вычислительной трудоемкости, эти методы в строгом виде для практически значимых расчетов РРВ до настоящего времени почти не применялись. Такие методы в основном находили применение для моделирования РРВ на малых пространственных областях – определение коэффициентов прохождения/отражения сквозь объекты с неоднородной структурой [2], в двумерной реализации для больших областей [3], в составе комбинированных методов, например, объединяющих трассировку лучей (приближение геометрической оптики и теории дифракции) и FDTD [4].

Рост вычислительных возможностей и оптимизация алгоритмов работы методов в будущем позволит применять трехмерные методы численного решения уравнений Максвелла для практических расчетов РРВ. Из работ, связанных с экспериментальной проверкой данных методов на практически значимых областях пространства, в настоящее время авторам известна лишь работа [5], в которой производится расчет уровня поля методом конечных разностей FDTD для области в здании размером 90 x 11 x 3 м на частоте 433 МГц с разрешением $\lambda/20$ и сравнение с результатами экспериментальных измерений. Стандартное отклонение ошибки прогнозирования уровня поля, полученное в [5], составило 15.5 дБ. Можно предположить, что

такая низкая точность была обусловлена отсутствием усреднения распределения поля для сглаживания быстрых замираний.

В данной работе для расчета пространственных распределений поля используется метод конечных интегралов [6], реализованный в программном продукте CST Microwave Studio. Метод конечных интегралов имеет высокую эффективность в задачах, в которых необходим анализ нестационарных процессов в неоднородном, анизотропном пространстве для объектов с произвольной формой границ. Этот численный метод обеспечивает универсальную схему пространственной дискретизации, которую можно применять к различным случаям, начиная со статического поля и заканчивая высокочастотными расчетами во временной и частотной областях. Ниже рассмотрены основные особенности этого метода, и показано его применение для различных способов расчета.

В отличие от большинства численных методов, метод конечного интегрирования рассматривает уравнения Максвелла не в дифференциальной, а в интегральной форме:

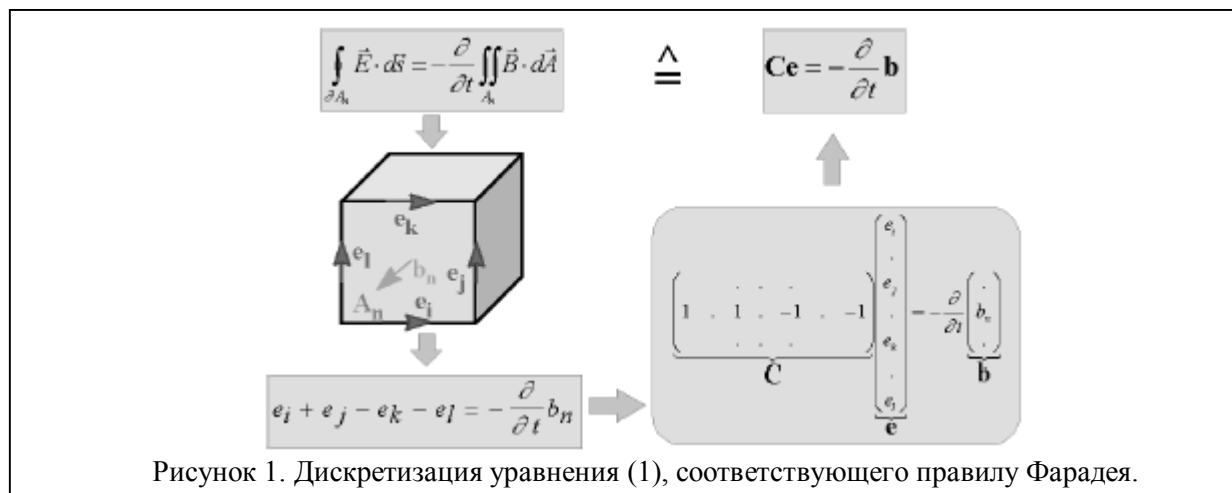
$$\oint_l \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_s \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s}, \oint_l \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_s \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{j} \right) \cdot d\vec{s} \quad (1)$$

$$\oiint_s \vec{D} \cdot d\vec{s} = \iiint_v \rho dV, \oiint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (2)$$

Для численного решения этих уравнений определяется область расчета. В процессе создания сетки эта область разбивается на ячейки. Эту сетку, называемую первичной, можно увидеть в программе Microwave Studio, но есть еще одна, вторичная или двойная сетка, которая строится ортогонально первичной.

Пространственная дискретизация уравнений Максвелла производится на этих двух ортогональных сетках.

После этого уравнения Максвелла отдельно записываются для каждой грани ячейки, как будет показано ниже. Если повторить описанную процедуру для всех граней ячейки, правило расчета может быть представлено в матричном виде: топологическая матрица C как дискретный эквивалент аналитическому оператору ротора. На рис. 1 показана процедура дискретизации первого из уравнений (1):



Если описанную схему применить к правилу Ампера на вторичной сетке, получим соответствующий дискретный оператор циркуляции \tilde{C} . Похожим образом дискретизация оставшихся уравнений дивергенции дает дискретные операторы \tilde{S} и S , соответствующие потоку, принадлежащие первичной и вторичной сетке соответственно. Эти дискретные

матричные операторы состоят только из элементов 0, 1 и -1 и представляют исключительно топологическую информацию. Окончательно имеем полностью дискретизированный набор так называемых сеточных уравнений Максвелла:

$$\mathbf{C}\mathbf{e} = -\frac{\partial}{\partial t}\mathbf{b}, \quad \tilde{\mathbf{C}}\mathbf{h} = \frac{\partial}{\partial t}\mathbf{d} + \mathbf{j} \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{d} = \mathbf{q}, \quad \mathbf{S}\mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (4)$$

В работе были произведены моделирование и экспериментальные исследования для области 5-го этажа здания физического факультета МГУ. Были выполнены расчеты распределения напряженности поля в горизонтальной плоскости на высоте 2 м от пола, а также вычислены профили временного в нескольких экспериментальных точках (около 15). Расчет проводился на частотах 400 МГц и 900 МГц.

Для расчетов использовались 2 модели части 5-го этажа: модель, охватывающая лишь область проведения измерений и соседние примыкающие помещения (около 100 м²), и модель, пространственный масштаб которой примерно в 2 раза больше, чем у первой (около 400 м²).

Параметры рабочей станции, на которой производился расчет: двухъядерный процессор Intel 2.6 ГГц, 2 Гб ОЗУ.

Максимальное количество ячеек, для которого возможно было выполнить расчет (ввиду ограниченной оперативной памяти), составило около 8,6 млн. Интересная особенность заключается в том, что количество ячеек возрастало неравномерно с увеличением частоты.

Максимальное значение частоты, для которого удалось выполнить расчет при указанных вычислительных мощностях: 875-925 МГц. Время расчета составляло от 40 мин. до 3 ч. в зависимости от частоты.

На рис. 2 представлен план части пятого этажа, в которой проводились измерения и моделирование, схема расположения точек измерения, а также пример результатов моделирования и измерений на частоте 900 МГц для первого местоположения передатчика.



В табл. 1 представлено сравнение результатов моделирования распределения уровня поля и результатов экспериментальных измерений. Как результаты расчета, так и результаты измерений усреднялись в $\lambda/2$ -окрестностях экспериментальных точек для устранения влияния быстрых замираний.

Таблица 1. Среднеквадратическое отклонение результатов расчета и экспериментальных измерений

Частота	Модель расчета	1 положение передатчика, СКО (дБ) для доли площади измерений:			2 положение передатчика, СКО (дБ) для доли площади измерений:		
		80 %	90 %	100 %	80 %	90 %	100 %
400 МГц		80 %	90 %	100 %	80 %	90 %	100 %
	CST Microwave Studio	2,08	2,55	3,63	2,93	3,89	5,17
	CST Microwave Studio, малая модель	2,33	2,68	3,66	Нет данных		
900 МГц		80 %	90 %	100 %	80 %	90 %	100 %
	CST Microwave Studio	3,68	4,34	5,20	3,27	3,91	4,63

Сравнение результатов расчета среднего уровня поля в $\lambda/2$ -окрестностях точек пространства и результатов экспериментальных измерений показало высокую точность расчета уровня поля методом численного решения уравнений Максвелла (метод конечных интегралов в среде CST Microwave Studio). Среднеквадратическое отклонение составило 2 – 3.7 дБ для рассмотренного диапазона частот 400 – 900 МГц и различных местоположений передатчика на 80 % площади измерений и 3.6 – 5.2 дБ для всей площади измерений. Можно предположить о нескольких причинах возникновения ошибки: погрешность геометрической конфигурации радиотехнической модели, возможные неточности диэлектрических характеристик материалов, используемых в модели, а также неучтенные детали моделируемой части здания, которые при данном пространственном масштабе влияют на распределение уровней поля. Использование существенно пространственно ограниченной модели в CST Microwave Studio, учитывающей лишь соседние прилегающие помещения к исследуемой зоне, показало лишь небольшое ухудшение точности расчета уровня сигнала (менее 0.3 дБ). Такая модель может быть использована для практических задач, обеспечивая существенную экономию вычислительных ресурсов.

Таким образом, метод конечных интегралов обеспечивает высокую точность прогнозирования и позволяет обеспечить детализацию расчета среднего локального уровня поля вплоть до пространственных масштабов длины волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.Н. Захаров, Е.В. Михайлов, А.Ф. Королев, А.П. Сухоруков, "Сравнительный анализ моделей численного решения уравнений Максвелла, приближений геометрической оптики и теории дифракции, изотропной модели при расчете распространения радиоволн внутри зданий", XII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн», ч.1, с. 68-71, 2009.
2. N.-R. Jeon, C.-H. Lee et al, "Performance of Channel Prediction Using 3D Ray-tracing Scheme Compared to Conventional 2D Scheme", Asia-Pacific Conference on Communications (APCC '06), pp. 1 - 6, 2006.
3. T. Hult, A. Mohammed, "Assessment of Multipath Propagation for a 2.4 GHz Short-Range Wireless Communication System", IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC2007-Spring), pp. 544 - 548, 2007.

4. Y. W. Chaudhuri, S.K. Safavi-Naeini, "An FDTD/ray-tracing analysis method for wave penetration through inhomogeneous walls", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 50, Issue 11, pp. 1598 - 1604, 2002.
5. L. Nagy, "Indoor Propagation Modeling for Short Range Devices", The Second European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), pp. 1 - 6, 2007.
6. M. Clemens, T. Weiland, "Discrete Electromagnetism with the Finite Integration Technique", Progress In Electromagnetics Research, PIER 32, pp. 65–87, 2001.